

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02**

на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 17.12.2020 № 14

О присуждении Порозовой Виктории Михайловне,

гражданке Российской Федерации,

ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Когерентное взаимодействие света с одиночными атомами и атомными ансамблями в условиях квантового вырождения» по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика» принята к защите 24 сентября 2020, протокол № 2, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г.

Соискатель Порозова Виктория Михайловна, 1992 г.р., в 2019 году окончила аспирантуру кафедры «Теоретическая физика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки «Физика и Астрономия» с присвоением диплома с квалификацией «Исследователь. Преподаватель-Исследователь». Экзамены по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика» успешно сданы соискателем в 2017-2019 гг. в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. В настоящее время работает в должности научного сотрудника Отделения «Центр перспективных исследований» в научной лаборатории «Квантовая оптика и квантовая информатика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и по совместительству младшим научным сотрудником Центра квантовых технологий Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Диссертация выполнена в научной лаборатории «Квантовая оптика и квантовая информатика» отделения «Центр перспективных исследований» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный руководитель** – д. ф.-м. н., Куприянов Дмитрий Васильевич - ведущий научный сотрудник Центра квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, и по совместительству заведующий научной лабораторией «Квантовая оптика и квантовая информатика» Отделения «Центр перспективных исследований» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Ведущая организация**- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт спектроскопии Российской академии наук» (ИСАН), расположенная по адресу ул. Физическая, д. 5, Москва, Московская обл., 108840, в своем положительном заключении, подписанном заведующим теоретическим отделом ИСАН, доктором физико-математических наук Камчатновым Анатолием Михайловичем, старшим научным сотрудником отдела лазерной спектроскопии ИСАН, кандидатом физико-математических наук Афанасьевым Антоном Евгеньевичем, председателем семинара, главным научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего отделом лазерной спектроскопии ИСАН, доктором физико-математических наук Рябовым Евгением Артуровичем, утвержденным директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт спектроскопии Российской академии наук», доктором физико-математических наук, профессором Виктором Николаевичем Задковым, указала, что содержание диссертации Порозовой В. М. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика», а диссертант Порозова В. М. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук. В заключении ведущей организации высказаны 3 замечания:

- В главе 2 показано, что развиваемый квантово-электродинамический подход приводит к формуле (2.27) для диэлектрической проницаемости конденсата, совпадающей с формулой для классического газа. Однако не отмечено, что такое совпадение связано, по-видимому, с тем, что в рассматриваемом приближении опущен вклад боголюбовских возбуждений, ведущих к малым модуляциям плотности конденсата. Для полноты излагаемого теоретического подхода было бы желательно дать оценку величины этого вклада.

- В главе 3 большое внимание уделено рассеянию света на решётке, образуемой в результате интерференции двух сталкивающихся конденсатных облаков. При этом молчаливо предполагается, что эта интерференционная картина статична и период решётки постоянен вдоль образца. Однако в реальных экспериментах возникающая при интерференции конденсатов волновая структура неоднородна и зависит от времени. Было бы желательно дать оценки того, насколько такая неоднородность и зависимость от времени влияет на обсуждаемые в диссертации эффекты.

- При рассмотрении одиночного атома в оптической дипольной ловушке автор рассматривает трёхмерный протокол рамановского охлаждения для перевода атома на колебательные подуровни оптического потенциала с пониженным значением квантового числа. При этом утверждается, что описанный подход является оптимальным. Однако в диссертационной работе отсутствует сравнение полученных результатов с другими работами в данной области. Непонятно, в чем заключаются принципиальные отличия предложенной схемы по сравнению с существующими аналогами. Например, как соотносятся предельные достижимые параметры по заселению колебательных подуровней оптического потенциала предложенным методом и экспериментальные результаты, продемонстрированные в работе [Kaufman A. M., Lester B. J., Regal C. A., “Cooling a single atom in an optical tweezer to its quantum ground state”, *Physical Review X*, 2, 041014 (2012)]

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт спектроскопии Российской академии наук» (ИСАН) ведет активные исследования в области теоретической физики, физики конденсированного состояния, квантовой оптики, атомной физики, взаимодействия оптического излучения с веществом. В частности, Д.ф.- м.н. Задков Виктор Николаевич является признанным специалистом в области лазерной физики, квантовой оптики, нанофотоники и квантовой информации: разработал теорию когерентной спектроскопии насыщения молекулярных газов, новый метод лазерного разделения изомеров при комнатных температурах, теорию модуляционной спектроскопии когерентных темных резонансов, обобщил концепцию стандартного квантового измерения, выполнил пионерские работы по квантовой оптике квантовых излучателей вблизи плазмонных наночастиц.

Д.ф.-м.н. проф. Камчатнов Анатолий Михайлович является специалистом в области физики конденсированного состояния, он использует методы теории решения нелинейных уравнений Гросса-Питаевского для расчета дисперсионных ударных волн в конденсате Бозе-Эйнштейна и моделирования осцилляционной динамики плотности атомов конденсата. Кроме того, в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки

«Институт спектроскопии Российской академии наук» имеется диссертационный совет Д 002.014.01 по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

### **Официальные оппоненты:**

1. Турлапов Андрей Вадимович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией ультрахолодных квантовых систем ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», расположенной по адресу ул. Ульянова, 46, БОКС-120, Нижний Новгород, 603950, дал положительный отзыв на диссертацию. Отзыв содержит 4 замечания:

- По сдвигу резонанса поглощения, заменяющему сдвиг Лоренца-Лоренца:

- не приведено объяснение причин изменения сдвига;- сдвиг отсутствует на графиках 3.2, 3.3;

- сдвиг Лоренца-Лоренца для бозе-конденсата воспроизведён в статье [Ruostekoski, Javanainen, PRA 56, 2056 (1997)];

не указаны причины рассогласования с этой статьёй.

- О роли бозе-конденсации.

В качестве одной из целей работы указан расчёт рассеяния на бозе-конденсате. В то же время из диссертации не ясно, в какой степени результаты являются следствием именно бозе-конденсации, а не следствием

- описания движения центра массы атома при помощи волновой функции и - эффекта суперпозиции.

В пользу важности суперпозиции стоит отметить, что рассеяние Брегга-Вульфа может возникать и в неконденсированном газе, но с суперпозицией. Примером служит эксперимент группы Т. Слейтора [PRL 79, 784 (1997)], в котором рассеивающая система – газ неконденсированный плоских волн  $\Xi(z)=\exp(ipz) + \exp(ipz-i2kz)$ , где импульсы  $p$  распределены по Больцману.

- По рассеянию на фрагментированном конденсате (раздел 3.2.1).

Описание атомной системы при помощи единой волновой функции (формула (3.3), имеет вид  $\Xi(z)=\exp(iqz) + \exp(-iqz)$ ) противоречит утверждению о фрагментации конденсата. Фрагментация – это невозможность сконденсироваться в одно многочастичное состояние [Leggett, Rev. Mod. Phys. 73, 307 (2001)]. Эта  $\Xi(z)$  соответствует не фрагментации, а единому конденсату в возбуждённом состоянии.

2. Соколов Иван Вадимович, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, ул. Ульяновская, 3, Физ.фак, каф. Общей физики 1, Старый Петергоф, Санкт-Петербург, 198504, дал положительный отзыв на диссертацию. Отзыв содержит 3 замечания:

- При построении связанных диаграмм теории возмущений в главе 2 автор не поясняет конкретно, какие промежуточные состояния атомов следует иметь в виду в неполном поляритонном пропагаторе во фрагментах, где учитывается спонтанный распад. Такое конструктивное пояснение было бы полезно для читателя.
- В оценке пределов рамановского охлаждения в главе 4 для полноты было бы уместно также оценить влияние на колебательную подсистему завершающей части цикла, т.е. оптической накачки.
- Имеются неизбежные погрешности оформления (например, не все гиперссылки ведут в нужное место).

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба имеют ученую степень докторов наук, они работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Основное содержание диссертации представлено в 4 научных статьях, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science:

1. V. M. Ezhova, L. V. Gerasimov, D. V. Kupriyanov, "On a theory of light scattering from a Bose-Einstein condensate"// J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — Vol. 769, no. 012045.
2. V. M. Porozova, L. V. Gerasimov, M. D. Havey, D. V. Kupriyanov, "Light scattering from an atomic gas under conditions of quantum degeneracy"// Phys. Rev. A. — 2018. — Vol. 97, no. 053805.
3. В. М. Порозова, В. А. Пивоваров, Л. В. Герасимов, Д. В. Куприянов, "Дифракция Брэгга в атомных системах в условиях квантового вырождения"// Письма в ЖЭТФ. — 2018. Т. 108, No 10, — С. 726-735.
4. V. M. Porozova, L. V. Gerasimov, I. B. Bobrov, S. S. Straupe, S.P. Kulik, and

D.V. Kupriyanov, "Raman sideband cooling of a single atom in an optical dipole trap: Towards theoretical optimum in a three-dimensional regime"// Phys. Rev. A. — 2019. — Vol. 99, no. 043406.

На автореферат поступило 3 отзыва.

1. Отзыв профессора кафедры теоретической физики и астрономии, доктора физико-математических наук, доцента Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена Трошина Александра Сергеевича (наб. р. Мойки, 48, Физ.фак, каф. Теоретической физики и Астрономии, Санкт-Петербург, 191186) положительный и не содержит замечаний.
2. Отзыв директора Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, доктора физико-математических наук Моисеева Сергея Андреевича (ул. Четаева, 18а, Академическое здание КНИТУ-КАИ №8, 1 этаж, Казань, 420126) положительный и не содержит замечаний.
3. Отзыв Тихонова Кирилла Сергеевича (ул. Ульяновская, 3, Физ.фак, каф. Общей физики 1, Старый Петергоф, Санкт-Петербург, 198504), старшего преподавателя Санкт-Петербургского государственного университета: к замечаниям можно отнести только отсутствие описания объема и структуры диссертации, а также недостаточную конкретность при описании научной новизны. В частности, не совсем понятно, для каких физических условий были получены результаты и на какую степень общности они претендуют. Последнее замечание, впрочем, не является критичным, поскольку все используемые в работе приближения были отражены в кратком изложении содержания работы.

**Научная новизна** обусловлена полученными в работе результатами, развивающими методы квантовой теории рассеяния света в приложении к атомным системам в условиях их глубокого охлаждения. Учитывая, что во многих экспериментальных работах продемонстрирована возможность образования суперпозиционных и перепутанных квантовых состояний, управление которыми осуществляется посредством внешних когерентных оптических полей, развитие подобных теоретических методов когерентного взаимодействия излучения с атомными ансамблями и одиночными атомами представляет практический интерес в направлении развития физики квантовой информации. В частности, результаты работы представляются важными для разработки систем квантового интерфейса между полевой и атомной подсистемами.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований получен ряд результатов, важных для решения современных теоретических задач квантовой оптики и квантовой информатики, а именно:

1. Проведен микроскопический расчет рассеяния света – одиночного фотона – на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения. Опираясь на общие принципы квантовой теории рассеяния, автором построено интегро-дифференциальное уравнение рассеяния для функции Грина оптического одночастичного возбуждения поляритонного типа.
2. Найдено аналитическое решение этого уравнения и проанализировано распространение одночастичного возбуждения в бесконечно протяженной однородной среде.
3. Обнаружено совпадение результатов независимых расчетов, основанных на квантовой теории рассеяния и на решении макроскопических уравнений Максвелла, что указывает на то, что при рассеянии света на ансамбле атомов с равномерным распределением плотности оптический отклик системы нечувствителен к тому, каким образом выполнено статистическое усреднение, предполагающее либо квантовое, либо классическое описание.
4. Исследовано рассеяние света на осцилляциях параметра порядка и плотности вещества, обусловленных интерференцией материальных волн - фрагментов конденсата Бозе-Эйнштейна. Показано, что данная неоднородная пространственная структура приводит к механизму рассеяния света, аналогичному явлению дифракции Брэгга-Вульфа.
5. Показано, что обнаруженный механизм рассеяния имеет определенные аналогии с распространением света в среде с периодической модуляцией диэлектрической проницаемости, обладающей свойствами фотонного кристалла.
6. Проведен теоретический анализ схемы рамановского охлаждения атома, захваченного оптическим пинцетом, предполагающей одновременное замедление во всех трех направлениях его движения.
7. Сформулированы и проанализированы условия оптимальной схемы рамановского охлаждения, использующей симметричную геометрию облучения и определённые установленные соотношения между частотами Раби управляющих полей.

## **Практическая значимость**

Диссертационная работа посвящена развитию методов квантовой теории рассеяния света на атомных системах в условиях их глубокого охлаждения. Это подразумевает системы тождественных атомов, находящихся в состоянии квантового вырождения, а также разработку оптимальных схем рамановского охлаждения, требующих замедления пространственного движения изолированного атома, пленённого потенциалом микроскопической дипольной ловушки. В ряде экспериментальных работ продемонстрирована возможность образования суперпозиционных квантовых состояний, управление которыми осуществляется посредством внешних когерентных оптических полей, представляющих несомненный интерес с точки зрения разработки систем квантового интерфейса. Теория рамановского охлаждения атома, захваченного микроскопической дипольной ловушкой - «оптическим пинцетом» - и оптимизация протокола охлаждения и локализации атома имеет важное практическое применение. Еще раз отметим успешные эксперименты в системах типа «оптического пинцета» в трехмерном режиме и возможность относительно простого управления коллективным состоянием атомов с помощью механизма дипольной блокады. Для достижения высокой согласованности квантовых логических операций необходимо осуществить охлаждение захваченного ловушкой атома, понизив его энергию вплоть до основного колебательного состояния.

## **Методология и методы исследования**

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждена использованием современного аппарата теоретической и математической физики. Взаимодействие света с атомной средой рассматривается на основе квантово-электродинамического подхода, инвариантной теории возмущений и диаграммных методов, обладающих высокой строгостью микроскопического описания физических процессов. В сочетании с методами численного моделирования развиваемые подходы обеспечивают необходимую точность и надежность результатов при описании рассматриваемых явлений.

## **Личный вклад**

Основные результаты, представленные в работе, были получены автором лично. Выбор темы, общего направления исследования, обсуждение и постановка рассматриваемых задач осуществлялись совместно с руководителем.

Диссертация Порозовой В. М. является законченным научным исследованием, вносящим определенный вклад в современные направления развития теоретической атомной физики и квантовой оптики.

На заседании 17 декабря 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Порозовой В. М. ученую степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика», участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 18, против – 0, воздержались – 0.

Зам. Председателя диссертационного совета

д. ф.-м. н.,

Бурков Александр Трофимович

и.о. ученого секретаря диссертационного совета

д. ф.-м. н.

Шубина Татьяна Васильевна

17 декабря 2020г.